

## **Auszieh Widerstand von Holzschrauben in Eschen-Brettschichtholz**

Pull-out resistance of timber screws in glue-laminated ash

Résistance à l'arrachement de vis bois dans le lamellé-collé en bois de frêne

Resistenza all'estrazione di viti per legno in legno lamellare

Ulrich Hübner  
holz.bau forschungs gmbh  
Graz, Österreich





# Auszieh Widerstand von Holzschrauben in Eschen-Brettschichtholz

## 1. Motivation

In Österreich stieg der Gesamtvorrat von Laubhölzern im Ertragswald zwischen 1986 und 2002 um 26 %, wobei er bei Buche um 19 %, bei Eiche um 22 % und bei Esche um 65 % zunahm. Von 1987 bis 2002 wuchs der Vorrat für alle Laubbaumarten in den westlichen Bundesländern Deutschlands um 32 %, die Steigerung belief sich auf 29 % bei Eiche und 26 % bei Buche (BW12, 2002). Stellt man Zuwachs und Nutzung in Deutschland gegenüber, ergibt sich, dass vom Zuwachs bei Eiche nur 30 %, bei Buche 46 % und bei den Laubhölzern im Allgemeinen nur 37 % genutzt wird.

In Österreich werden vom Rohholz, d.h. dem berindeten Stamm mit Ästen und Krone, zwei Drittel einer energetischen Nutzung zugeführt. Stofflich genutzt wird derzeit ein Drittel. Nur 15% werden als Sägerundholz mit einem Mitteldurchmesser größer 20 cm weiterverarbeitet.

Aus der waldbaulichen Situation heraus ergibt sich die Notwendigkeit der vermehrten Verwendung von Laubholz. Die hervorragenden mechanischen Eigenschaften und die edle Ästhetik sprechen für den Einsatz von einheimischen Laubhölzern für lastabtragende Bauteile im Bauwesen.

Für die Esche spricht, dass sie weniger quillt und schwindet als die Buche, wodurch die Klebefugen in Brettschichtholz bei Klimaschwankungen geringeren Beanspruchungen ausgesetzt sind. Die Festigkeits- und Steifigkeitseigenschaften liegen etwas über denen von Buche. Um die praktische Anwendung von Bauteilen aus Eschen-BSH voran zu treiben sind genaue Kenntnisse der relevanten Eigenschaften im Bauteilmaßstab und eine angepasste Verbindungstechnik nötig. Die Untersuchung des axialen Auszieh Widerstandes von Holzschrauben bzw. Gewindestangen mit Gewinde nach DIN 7998:1975 in Eschen-BSH stellt nach der Festigkeitssortierung (Hübner und Leeb 2007), den Querdruck- und Querkugeigenschaften (Hübner 2009), dem Schubmodul und der Lochleibungsfestigkeit (Hübner et al. 2008) einen weiteren wichtigen Schritt in Richtung des Einsatzes von Laubholzprodukten für lastabtragende Bauteile im Bauwesen dar.

## 2. Literaturrecherche

Die derzeitigen Erkenntnisse zum axialen Auszieh Widerstand von Holzschrauben in europäischen Laubhölzern mit im Bauwesen relevanten Durchmessern von 6 mm bis 20 mm sind spärlich, nur Jablonkay (1999) und Schneider veröffentlichten bisher entsprechende Untersuchungen.

Mit etwa 10 000 Prüfungen führte Fairchild (1926) sehr umfangreiche Untersuchungen zum optimalen Vorbohrdurchmesser und Auszieh Widerstand von Holzschrauben an Tulpenbaum, Echter Sumpfyypresse, Sumpf-Kiefer, Rot-Kiefer, Amerikanische Platane, Zucker-Ahorn und Amerikanische Weiß-Eiche durch. Eine Regressionsanalyse der Daten zeigt in Abbildung 7, dass die Ergebnisse durchaus mit heutigen korrespondieren.

Cockrell (1933) untersuchte den Auszieh Widerstand von Holzschrauben ( $\varnothing$  3,51 mm bis 4,83 mm) in 19 mm starken Brettern aus sechs Laub- und vier Nadelholzarten unterschiedlicher Holzfeuchte. Aus den Ergebnissen kann man berechnen, dass der Auszieh Widerstand bei Holzarten mit Rohdichten ab  $\rho_{12} = 650 \text{ kg/m}^3$  um 1,9 % je Prozent steigen der Holzfeuchte sinkt.

Prof. Eckelman hat zum Thema Holzschrauben im Möbelbau mehr als ein Duzend Beiträge veröffentlicht und forscht seit den 1960er Jahren bis in die jüngste Zeit im Bereich der Fertigungstechnik und der Berechnung im Möbelbau. Eckelman (1975) stellt fest, dass bei Vollholz die Ausziehtragfähigkeit besser mit der Scherfestigkeit parallel zur Faser als mit der Rohdichte korreliert.

Der Einfluss des Auszieh Widerstands, des Schraubendurchmessers, der Schraubenlänge und der Rohdichte wurde auf das Trag- und Verformungsverhalten von einschnittigen Stahlblech-Holz-Verbindungen von Akamatsu (1990) mit Kerb-Buche, Mandschurische Esche und Douglasie und 25 mm langen Holzschrauben ( $\varnothing$  3,1 mm bis  $\varnothing$  4,5 mm) untersucht.

Die von Bröker und Krause (1991) durchgeführten Prüfungen zur Ermittlung des Haltevermögens von dynamisch beanspruchten Schrauben nach DIN 96:1986, DIN 97:1986 und Spanplattenschrauben beinhalten auch solche zur statischen Ausziehtragfähigkeit von Schrauben mit 3,5 mm bis 5 mm Durchmesser in Buchenholz ( $\rho_{\text{mean}} = 720 \text{ kg/m}^3$ ). Berechnet man aus den Versuchsergebnissen die Scherspannung in der Mantelfläche unter Abzug des einfachen Schraubendurchmessers von der nominellen Einschraubtiefe zur Berücksichtigung des Spitzeneinflusses erhält man als Mittelwert  $15,0 \text{ N/mm}^2$ , welcher gut mit den Ergebnissen für Esche ähnlicher Rohdichte übereinstimmt (Abbildung 6).

In seiner Diplomarbeit untersuchte Jablonkay (1999) mit insgesamt 911 Versuchen den Einfluss der Holzfeuchte, der Rohdichte und des Winkels zwischen Schraubenachse und Faserrichtung auf den Auszieh Widerstand von EJOT-Rahmenankern. Schneider leitet aus den Ergebnissen mittels Regressionsanalysen die Exponenten 1,78 für die Rohdichte und 0,86 für die Einschraubtiefe unter  $0^\circ$  bzw. 0,84 für  $90^\circ$  ab und stellt einen erheblichen Einfluss der Holzfeuchte auf die Scherfestigkeit in der Mantelfläche fest.

Bejtka (2005) ermittelt eine Regressionsgleichung für die Maximalkräfte aus 413 Durchdruckversuchen mit 5 senkrecht zur Faser eingedrehten Schraubentypen (6 mm, 7,5 mm, 8 mm, 10 mm, 12 mm) von 3 verschiedenen Herstellern in Fichtenholz. Blaß, Bejtka und Uibel (2006) führen diese Untersuchungen mit Einschraubwinkeln von  $0^\circ$  bis  $90^\circ$  in  $15^\circ$ -Schritten, mit einer beanspruchten Gewindelänge von  $4 d$  mit 799 Prüfungen in Fichtenholz fort und legen damit die Grundlage der Modellbildung in ON EN 1995-1-2009.

Pirnbacher (2009) ermittelte die Einflüsse von Holzfeuchte, Temperatur, Rohdichte und Schraubenachsen-Faser-Winkel auf den Auszieh Widerstand von Holzschrauben in Fichte und stellt ein Berechnungsmodell für Mittelwerte vor. Frese (2009) analysiert ebenfalls Auszieh Widerstände in Nadelholz und stellt die Konstanz des Ausziehparameters zwischen  $45^\circ$  und  $90^\circ$  fest.

### 3. Probekörper

#### 3.1. Eschen-Brettschichttholz

Das verwendete Eschen-Brettschichttholz wurde aus Lamellen mit einer Stärke von etwa 27 mm durch das Verkleben mit Kauramin-Leim 683 und Kauramin-Härter 688 hergestellt. Die Bretter stammen aus der „Buckligen Welt“ im Wuchsgebiet „Östliche Randalpen“ in Österreich.

Die Probekörper für die Einschraubwinkel von  $15^\circ$  bis  $75^\circ$  wurden aus sechs Eschen-Brettschichttholz-Balken dem Winkel entsprechend schräg herausgeschnitten. Die Abstände zwischen den Schrauben und zu den Rändern betrugen i.d.R.  $5 d$ . Die Probekörper für  $\varnothing$  20 mm waren mindestens 140 mm breit und wurden mit vier bzw. acht Holzschrauben  $\varnothing$  8/160 gegen Querkzugversagen gesichert..

#### 3.2. Schrauben

Folgende Schrauben bzw. Gewindestangen kamen zum Einsatz:

- $\varnothing$  6/300 Schmid Star Drive Teilgewinde mit Halbspitze (Z-9.1-656)
- $\varnothing$  8/300 Schmid Star Drive Vollgewinde mit Halbspitze (Z-9.1-656)
- $\varnothing$  10/300 und 12/300 Spax-S-Schraube, CUT-Spitze (Z-9.1-519)
- $\varnothing$  20/600 SFS WB Gewindestangen

Alle Schrauben wurden mit etwa dem 0,7-fachen Außendurchmesser vorgebohrt und die Gewindestangen mit dem Kerndurchmesser.

Aus sechs verschiedenen Chargen der  $\varnothing 8/300$  Schmid Star Drive wurden insgesamt 36 Schrauben entnommen und auf Zug geprüft. Die meisten Schrauben plastisierten in Höhe der ersten vier Gewindegänge unterhalb des Kopfes. Im Mittel lag die Zugkraft bei 25,9 kN. Der Variationskoeffizient betrug 1,27 %, das 5 %-Perzentil der empirischen Verteilung lag bei 25,3 kN und die kleinste Zugfestigkeit bei 25,1 kN. Der charakteristische Wert der Zugtragfähigkeit ist mit  $R_{t,u,k} = 23,0$  kN in der Zulassung angegeben.

### 3.3. Klimatisierung

Alle Probekörper wurden bis zur Massekonstanz bei einer relativen Luftfeuchte von  $(65 \pm 5)$  % und einer Temperatur von  $(20 \pm 1)$  °C gelagert.

### 3.4. Umfang der Prüfungen

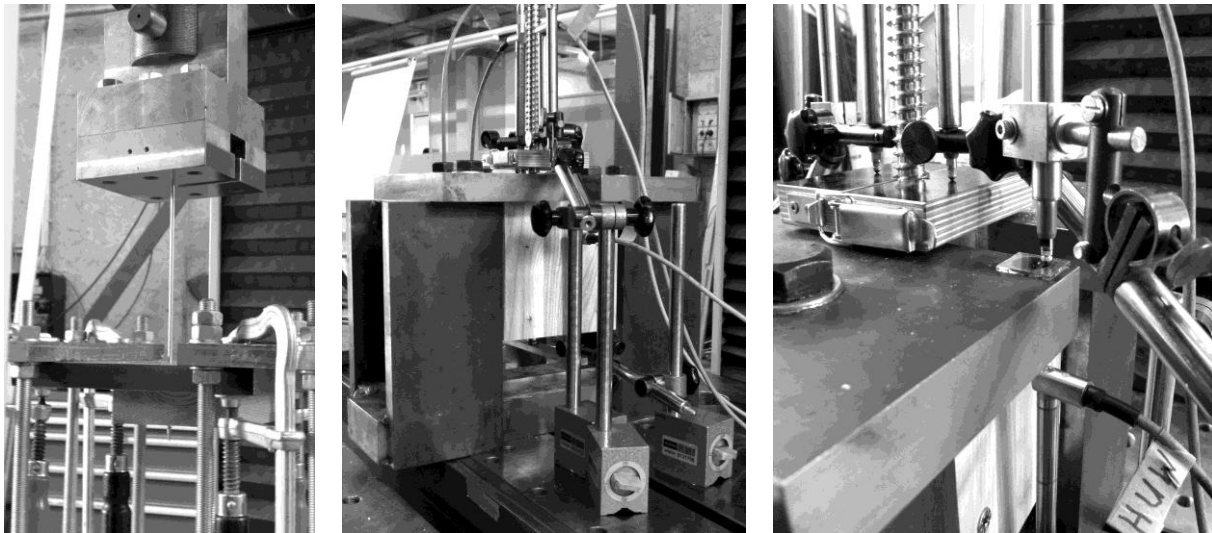
Für die Schraubendurchmesser 8 mm, 10 mm und 12 mm wurden die Schrauben-Faser-Winkel  $0^\circ$ ,  $15^\circ$ , ... ,  $90^\circ$  mit 21 Serien untersucht. Bei den Schrauben mit 6 mm und 20 mm Durchmesser wurden längs und quer zur Faser insgesamt vier Serien geprüft. Die Einschraubtiefen lagen i.d.R. bei  $6 d$  und es wurden die Schrauben durch den Prüfkörper geschraubt, sodass die Schraubenspitze und Gewindeteile mit Wellenschliff außerhalb des Probekörpers lagen. Es wurden 60 Prüfungen je Serie durchgeführt. Bei 20 mm Durchmesser lag die Einschraubtiefe abweichend bei  $8 d$  und die zwei Serien enthielten 22 bzw. 20 Prüfkörper. Um den Einfluss der Einschraubtiefe zu untersuchen, wurden zusätzlich  $4 d$  und  $8 d$  tief eingedrehte Holzschrauben  $\varnothing 8$  mm quer zur Faser geprüft. Um den Einfluss der Schraubenspitze auf den Auszieh Widerstand zu prüfen, blieb bei acht weiteren Serien die Schraubenspitze im Probekörper und schloss bündig mit der Oberfläche desselben ab. Insgesamt wurden 2379 Auszieh Widerstände bestimmt. Die Serien wurden mit ESDD\_WW\_LL bezeichnet, wobei ES für Esche, DD für den Schraubendurchmesser, WW für den Einschraubwinkel und LL für die Probekörperdicke steht. War die Schraubenspitze im Probekörper eingebettet, wurde ein „S“ an die Serienbezeichnung angefügt.

## 4. Versuchseinrichtung und –durchführung

### 4.1. Versuchseinrichtung für Schrauben

Der Senkkopf der Schrauben wurde von einer entsprechend angesenkten dicken Unterlegscheibe erfasst, welche selbst in einer passenden Vertiefung im Ausziehkopf lag. Somit war eine Zentrierung sichergestellt. Bei den Durchmessern von 6 mm bis 12 mm wurden die Probekörper nach dem Vorlaufweg gegen eine Stahlplatte mit einer  $4 d$  großen Bohrung gezogen, womit der Mindestwert nach ON EN 1382: 1999 von  $3 d$  erfüllt wurde. Um auch hier die zentrische Lage sicherzustellen, wurden passgenaue Ringe eingelegt, die nach dem Erreichen der Vorkraft entfernt wurden (Abbildung 1a).

Mit einem speziellen Klemmteil am Schraubengewinde oberhalb der Stahlplatte wurden bei 8 Serien die Relativverschiebung des Gewindes gegenüber der Stahlplatte mit induktiven Wegaufnehmern (Genauigkeitsklasse 1, 10 mm) gemessen. Bei den Serien mit der Schraubenspitze außerhalb des Probekörpers wurde deren Vertikalverschiebung gegenüber dem unteren Biegebalken (Abbildung 1b) der Prüfmaschine aufgezeichnet.



a) Haltevorrichtung  $\varnothing$  6 mm    b) Haltevorrichtung für  $\varnothing$  20 mm    c) Klemmvorrichtung an Gewindestange  
Abbildung 1: Prüfkongfiguration für die Ausziehprüfungen nach ON EN 1382: 1999

## 4.2. Versuchseinrichtung für Gewindestangen

Die Gewindestangen mit einer Lieferlänge von 3 m wurden mit dem Trennschleifer in 60 cm lange Stücke gekappt. An einem Ende wurde auf einer Länge von 100 mm das Gewinde bis auf den Kerndurchmesser abgedreht. Die Gewindestangen wurden mit einem Viergang-Drehbohrer DDsk 672-1 der Firma Fein mit 100 U/min unter Zuhilfenahme der Eindrehhülse von SFS soweit eingeschraubt, dass die Eindrehhülse gerade nicht ins Holz eindrang.

Der Probekörper mit Gewindestange konnte zwischen die Kragarme einer speziellen Haltevorrichtung seitlich eingeführt werden, deren Kanten vom Gewindestangenaußendurchmesser mindestens 30 mm Abstand hatten. Das abgedrehte Ende der Gewindestange wurde mit der Klemmeinrichtung 647 Hydraulic Wedge Grip der Firma MTS Corporation of Minneapolis geklemmt.

Mit zwei induktiven Wegaufnehmern (Genauigkeitsklasse 1, 10 mm) in Magnetstativen wurde die vertikale Verformung der Kragarme der Haltevorrichtung gegenüber dem unteren Biegebalken gemessen. Auf das untere Ende der Gewindestange wurde ein Aluminiumbalken geklebt und dessen vertikale Relativbewegung ebenso gemessen (Abbildung 1b). Oberhalb der Kragarme wurde durch eine Klemmvorrichtung an der Gewindestange die Vertikalverschiebung der Gewindestange mit zwei induktiven Wegaufnehmern (Genauigkeitsklasse 1, 10 mm) gemessen (Abbildung 1c).

Alle Ausziehprüfungen erfolgten gemäß ON EN 1382:1999. Die gleichförmige Belastungsgeschwindigkeit wurde zwischen 1 mm/min bei  $\varnothing$  6 mm und 2 mm/min bei  $\varnothing$  20 mm so aufgebracht, dass die maximale Zugkraft innerhalb von  $(90 \pm 30)$  s erreicht wurde.

## 5. Auswertung

Die Datensätze wurde einschließlich von Ausreißern in die Auswertung übernommen. Eine Analyse der Extremwerte und ihrer Ursachen wird erst noch folgen.

### 5.1. Rohdichte und Holzfeuchte

Für die Bestimmung der Rohdichte wurde das Holz um den Schraubkanal quaderförmig mit  $4 d \times 4 d \times$  Probekörperdicke herausgeschnitten, mit einem digitalen Messschieber vermessen und mit der Präzisionswaage die Masse bestimmt. Die Vorbohrung wurde vom Volumen abgezogen. Die Rohdichte wurde mit Hilfe des Volumenschwindmaßes  $\beta_v = 0,44 \text{ \%/\%}$  auf die Referenzholzfeuchte von 12 % umgerechnet.

Der Mittelwert ergab sich zu  $\rho_{\text{mean}} = 752 \text{ kg/m}^3$  ( $\text{COV} = 6,0 \%$ ,  $\rho_{05} = 679 \text{ kg/m}^3$ ,  $\rho_{95} = 830 \text{ kg/m}^3$ ). Die Boxplots der Rohdichten der einzelnen Serien bei 12 % Holzfeuchte sind in Abbildung 3 dargestellt. Die strichlierte Linie gibt  $\rho_{\text{mean}}$ , die fein strichlierten Linien stehen für  $\rho_{05}$  und  $\rho_{95}$ . Die Serien ES06\_90\_36 und ES20\_90\_160 weisen erhöhte Rohdichten auf.

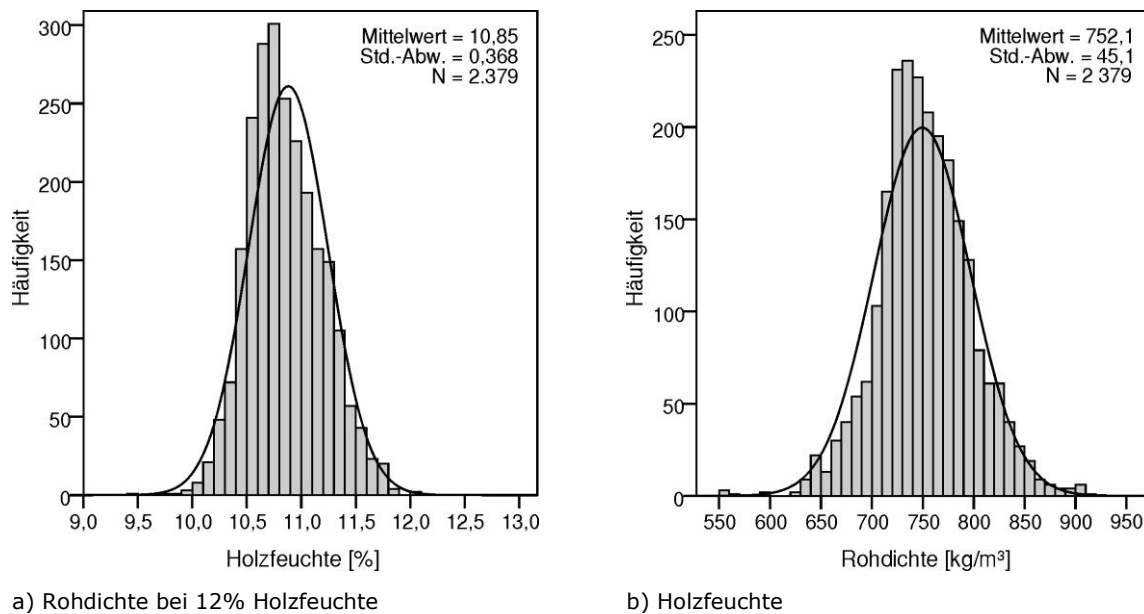


Abbildung 2: Histogramme zur Rohdichte und Holzfeuchte

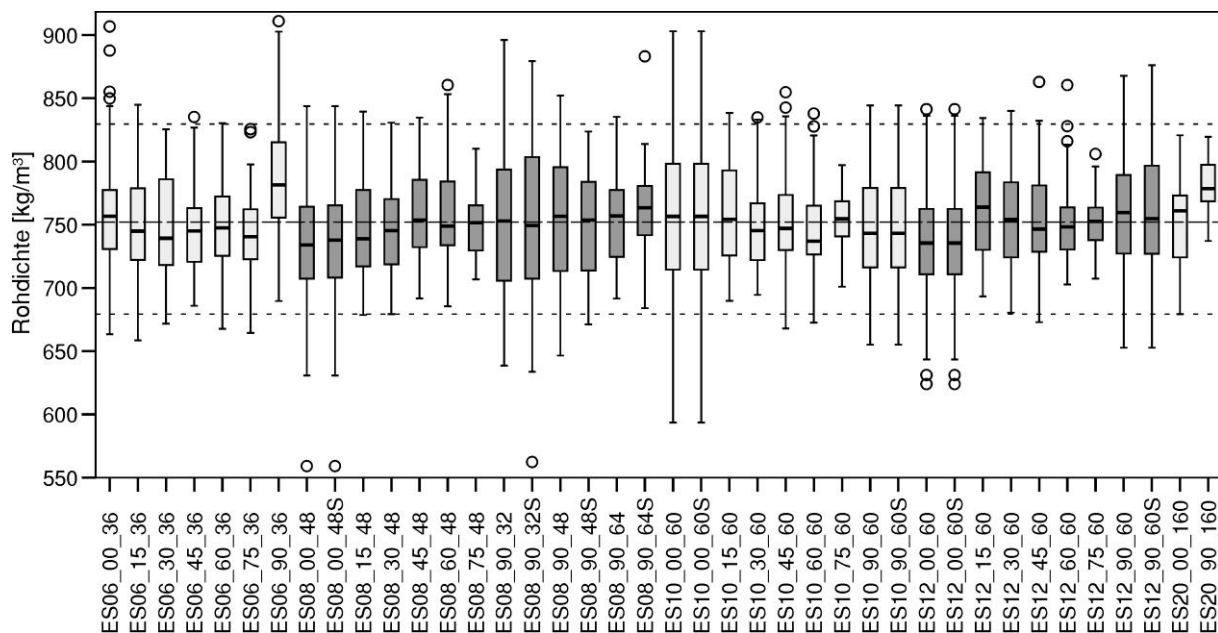


Abbildung 3: Boxplots der Rohdichten der einzelnen Serien bei 12% Holzfeuchte

An den Quadern wurde die Holzfeuchte nach EN 13183-1:2004 bestimmt. Sie lag im Mittel bei 10,85 %, der Variationskoeffizient betrug 3,4 % (Abbildung 2a).

Kollmann (1941) gibt das hygroskopische Gleichgewicht für Adsorption und Desorption bei 20 °C an. Für 65 % rel. Luftfeuchte ergibt sich eine untere Ausgleichsfeuchte von 10,7 % und eine obere von 14,1 %. Eigene Untersuchungen mit 43 Probekörpern ergeben bei einer relativen Luftfeuchte von  $(65 \pm 5) \%$  und einer Temperatur von  $(20 \pm 1) ^\circ\text{C}$  eine obere Ausgleichsfeuchte von 13,9 %. Der Mittelwert der Holzfeuchte der Probekörper von 10,85 % kann als untere Ausgleichsfeuchte angenommen werden, da das Eschenholz zuvor in einem trockeneren Klima gelagert wurde.

## 5.2. Einfluss der Schraubenspitze

Die Ausformung der Schraubenspitze bedingt eine gegenüber dem Regelgewinde schlechtere Verankerung des Schraubenendes im Holz. Die Scherfestigkeit  $f_{v,M}$  in der Mantelfläche um den eingebetteten Gewindeteil der Holzschraube ergibt sich aus der Division der maximalen Ausziehungskraft  $F_{\max}$  durch die Mantelfläche  $A_M = \pi \cdot d \cdot l_{\text{eff}}$ . Die Scherfestigkeit ist bei Einbettung mit Spitze geringer als ohne. Rechnerisch kann die nominelle Einschraubtiefe  $l_{\text{nom}}$  bei eingebetteter Spitze so um den Betrag  $x \cdot d$  verkürzt werden, dass sich die effektive Einschraubtiefe  $l_{\text{eff}}$  nach Gleichung (1) ergibt, bei der die Auszugskraft des normalen Gewindes ohne Spitze gleich groß wäre.

$$l_{\text{eff}} = l_{\text{nom}} - x \cdot d \quad (1)$$

Tabelle 1: Serien ohne und mit Einbindung der Schraubenspitze

| Ohne Spitze          | Mit Spitze  | $x$  |
|----------------------|-------------|------|
| ES08_00_48           | ES08_00_48S | 1,28 |
| ES08_90_32           | ES08_90_32S | 2,02 |
| ES08_90_48           | ES08_90_48S | 0,98 |
| ES08_90_64           | ES08_90_64S | 0,76 |
| ES10_00_60           | ES10_00_60S | 1,29 |
| ES10_90_60           | ES10_90_60S | 0,98 |
| ES12_00_60           | ES12_00_60S | 1,00 |
| ES12_90_60           | ES12_90_60S | 1,10 |
| Mittelwert $\bar{x}$ |             | 1,11 |

Die Variable  $x$  errechnet sich nach Gleichung (2) und ist für die untersuchten Serien in Tabelle 1 angegeben. Schließt man die extremen kursiv dargestellten Werte aus, ergibt sich der Mittelwert  $\bar{x} = 1,11$ .

$$x = \frac{l_{\text{nom}}}{d} - \frac{l_{\text{nom}} \cdot R_{\text{mit Spitze}}}{d \cdot R_{\text{ohne Spitze}}} \quad (2)$$

## 5.3. Scherfestigkeit

Die mittlere Scherfestigkeit in der Mantelfläche einer Holzschraube wird durch den Einschraubwinkel, Holzart, Rohdichte, Holzfeuchte, Temperatur und den Schraubendurchmesser beeinflusst. In Abbildung 4 sind für die Schraubendurchmesser 6 mm, 8 mm, 10 mm, 12 mm und 20 mm die mit der Rohdichte korrigierten Scherfestigkeiten für die Winkel von 0°, 15°, ... , 90° dargestellt. Der Korrekturfaktor ergab sich aus  $(\rho_{\text{mean}}/\rho_i)^{1,60}$ , wobei  $\rho_i$  die Rohdichte des jeweiligen Probekörpers darstellt. Der Exponent wird im Abschnitt 5.4 näher erläutert. Man erkennt den Anstieg der Scherfestigkeit mit größer werdendem Einschraubwinkel und den Abfall mit steigendem Durchmesser. Die Formel nach Hankinson (1921) bildet die Winkelabhängigkeit für die Mittelwerte gut ab. Tendenziell ist der Interquartilsabstand, d.h. die Höhe der Box bei einem Einschraubwinkel von 0° oder 15° größer als bei den höheren Winkeln.



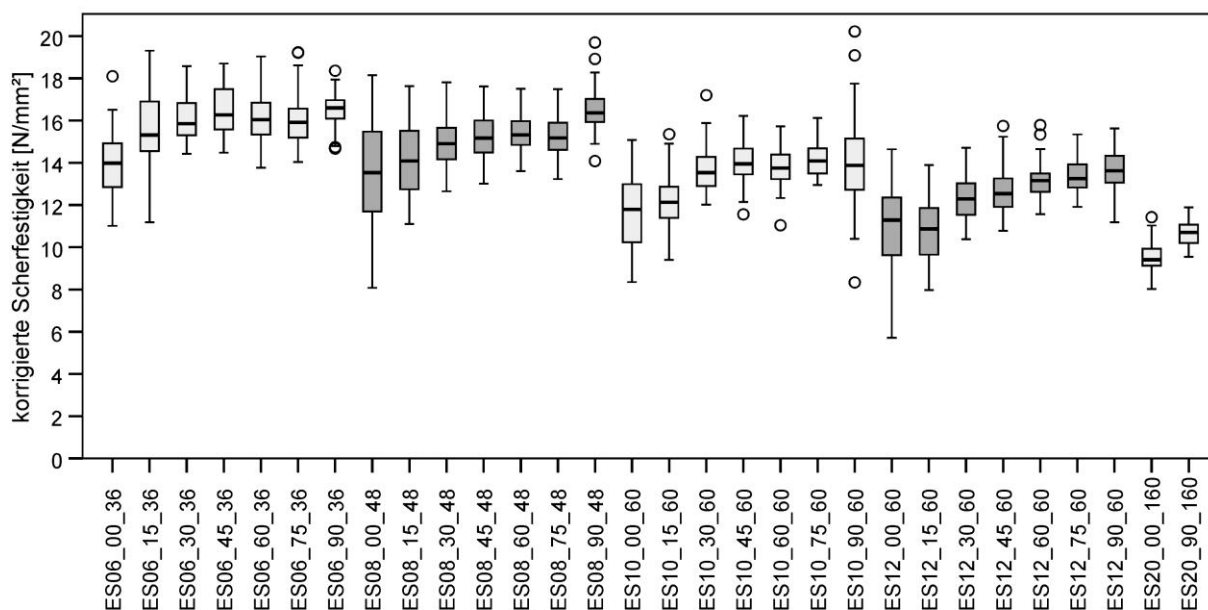
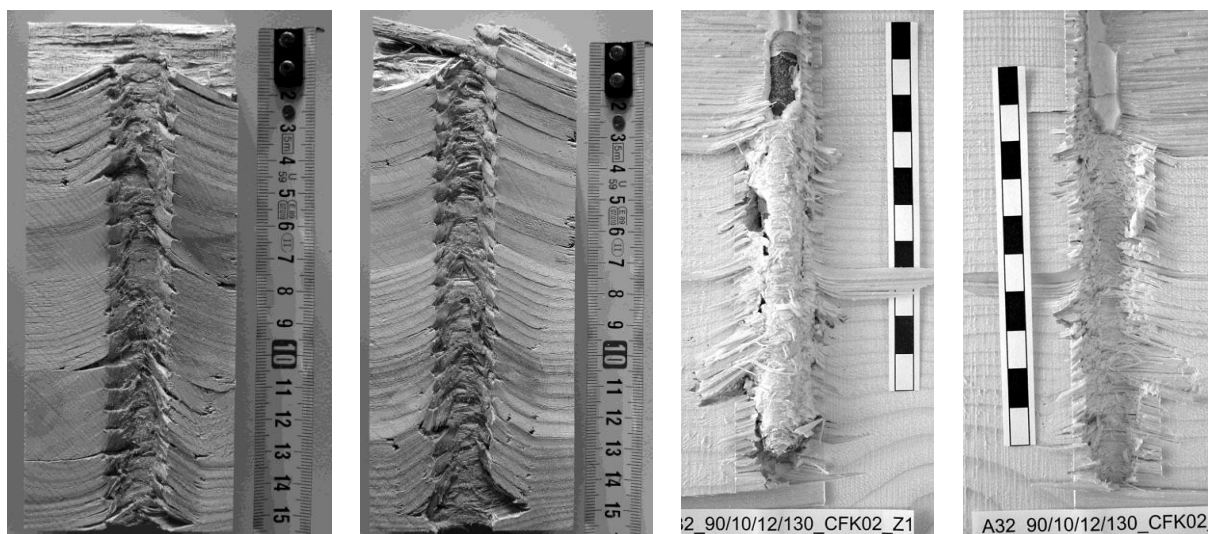


Abbildung 4: Boxplots mit der Rohdichte korrigierten Scherfestigkeiten der einzelnen Serien

Dividiert man die Mittelwerte der Scherfestigkeiten bei einem Einschraubwinkel von  $90^\circ$  durch jene bei  $0^\circ$  ergeben sich für die Durchmesser 6 mm, 8 mm, 10 mm, 12 mm bzw. 20 mm 1,18, 1,23, 1,21, 1,23 und bzw. 1,13. Der Mittelwert beträgt 1,20, wie dies in ON EN 1995-1-1:2009 in Gleichung (8.28) berücksichtigt wurde.

Die Scherfestigkeit fällt für ähnliche Schlankheiten  $\lambda = l_{\text{eff}} / d$  mit steigendem Durchmesser für alle Einschraubwinkel wie in Abbildung 6 dargestellt ab. Die grau eingezeichneten logarithmischen Funktionen bilden diesen Größeneffekt für die Mittelwerte bei  $0^\circ$  bzw.  $90^\circ$  ab.

Wie der Vergleich von Abbildung 5a und 5b zeigt, gibt es trotz der großen Unterschiede zwischen den Holzarten Esche und Fichte Ähnlichkeiten zwischen den Bruchbildern von quer zur Faser ausgezogenen Gewinde- bzw. eingeklebten CFK-Stangen. In beiden Fällen werden die Fasern aufgebogen, es bilden sich Querszug- und Schubrisse und im Abstand vom einfachen Durchmesser reißen teilweise ganze Faserbündel ab.



a) aufgebogene und abgerissene Fasern im Eschen-BSH

b) Bruchbilder von Probekörpern der Serie „zu rückgesetzter Verbund“ mit zähmodifiziertem Klebstoff nach Pörtner (2008)

Abbildung 5: Ähnlichkeiten der Bruchbilder bei ausgezogenen Gewinde- und eingeklebten CFK-Stangen

Bernasconi (2000) schlägt für die Bemessung von in Nadelholz eingeklebten Gewindestangen nach dem Swisscode vor, dass die charakteristische Schubfestigkeit bei Stangen mit  $f_{va,90,k} = 25 \cdot d_a^{-0,5}$  quer zur Faser und mit  $f_{va,0,k} = 30 \cdot d_a^{-0,5} \cdot (l_e/d_a)^{-0,3}$  längs zur Faser bemessen wird. Setzt man für die Einkleblänge  $l_e$  die bei den Ausziehversuchen übliche Länge von  $6 d$  ein, ergeben sich die in Abbildung 6 dargestellten Kurven. Nach Bernasconi (2000) gelten die Angaben für  $d_a \geq 10$  mm. Vergleicht man die Kurvenverläufe der logarithmischen Funktionen für die Scherfestigkeit bei Holzschrauben mit denen nach Bernasconi (2000) stellt man die ähnlichen Anstiege fest. Würde man die Funktionen nach Bernasconi (2000) für kleinere Durchmesser anwenden, ergäben sich zu hohe Scherfestigkeiten. In den kommenden Monaten sind daher Ausziehprüfungen mit Holzschrauben  $\varnothing 4$  mm quer und längs zur Faser in Eschenholz geplant, um die Gültigkeit der logarithmischen Funktionen auch im Bereich kleiner Durchmesser sicherzustellen.

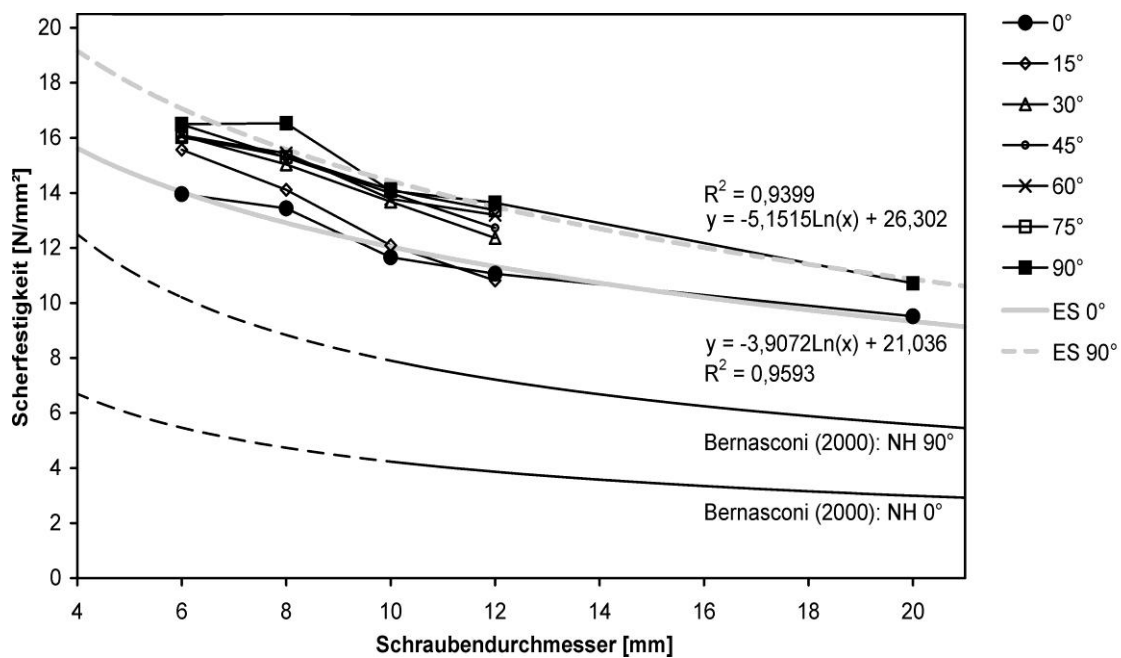


Abbildung 6: Mittelwerte der Scherfestigkeit für die verschiedenen Einschraubwinkel in Abhängigkeit vom Schraubendurchmesser

Tabelle 2: Maximale effektive Einschraublängen bei einer Stahlzugfestigkeit von 800 N/mm² und einem Verhältnis Kerndurchmesser/Außendurchmesser von 0,70

| Durchmesser<br>$d$<br>[mm] | Zugtragfähigkeit<br>$R_{ax}$<br>[N] | Schraubenachse-Faser-Winkel 0°            |                                                      |                                        | Schraubenachse-Faser-Winkel 90°            |                                                       |                                           |
|----------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------------|------------------------------------------------------|----------------------------------------|--------------------------------------------|-------------------------------------------------------|-------------------------------------------|
|                            |                                     | Scherfestigkeit<br>$f_{v,M,0}$<br>[N/mm²] | max. eff. Einschraublänge<br>$l_{eff,max,0}$<br>[mm] | max. Schlankheit<br>$\lambda_0$<br>[-] | Scherfestigkeit<br>$f_{v,M,90}$<br>[N/mm²] | max. eff. Einschraublänge<br>$l_{eff,max,90}$<br>[mm] | max. Schlankheit<br>$\lambda_{90}$<br>[-] |
| 6                          | 11 084                              | 14,0                                      | 42                                                   | 7,0                                    | 17,1                                       | 34                                                    | 5,7                                       |
| 8                          | 19 704                              | 12,9                                      | 61                                                   | 7,6                                    | 15,6                                       | 50                                                    | 6,3                                       |
| 10                         | 30 788                              | 12,0                                      | 81                                                   | 8,1                                    | 14,4                                       | 68                                                    | 6,8                                       |
| 12                         | 44 334                              | 11,3                                      | 104                                                  | 8,7                                    | 13,5                                       | 87                                                    | 7,3                                       |
| 16                         | 78 816                              | 10,2                                      | 154                                                  | 9,6                                    | 12,0                                       | 130                                                   | 8,2                                       |
| 20                         | 123 150                             | 9,3                                       | 210                                                  | 10,5                                   | 10,9                                       | 180                                                   | 9,0                                       |

In Tabelle 2 sind die maximalen effektiven Einschraublängen in Abhängigkeit vom Durchmesser bei einer Stahlzugfestigkeit von 800 N/mm² und einem Verhältnis Kern zum Außendurchmesser von 0,70 dargestellt. Beide Angaben können je nach Hersteller und Schraubenprodukt schwanken. Man erkennt, dass die erreichbare Schlankheit mit dem Durchmesser steigt, jedoch durch die höheren Scherfestigkeiten im Eschenholz gegenüber dem Nadelholz weit unter den dort üblichen Schlankheiten von 12 bis 16 bleibt.

Im Eschenholz benötigt man also eine wesentlich geringere Einschraublänge um die gleiche Kraft zu übertragen.

## 5.4. Regressionsanalyse

Eine erste Regressionsanalyse nach Gleichung (3) wurde zur Bestimmung des Exponenten der effektiven Einschraublänge mit den Serien ES08\_90\_32, ES08\_90\_48 und ES08\_90\_64 durchgeführt und  $B = 0,93$  ermittelt. Das Bestimmtheitsmaß nach Gleichung (5) betrug 0,93.

$$R_{ax} = A \cdot l_{ef}^B \cdot \rho^C \quad (3)$$

$$R_{ax,\alpha} = \frac{A \cdot l_{ef}^B \cdot \rho^C \cdot d^D}{\sin^2(\alpha) + E \cdot \cos^2(\alpha)} \quad (4)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\text{Residuenquadratsumme}}{\text{Korrigierte Quadratsumme}} \quad (5)$$

In einem zweiten Schritt wurden alle Serien mit durchgeschraubter Schraubenspitze einbezogen. Da bei den Serien ES20\_00\_160 und ES20\_90\_160 derzeit nur 22 bzw. 20 Ergebnisse zur Verfügung stehen, gingen diese Serien dreifach ein, um ebenfalls rund 60 Datensätze pro Serie zu erhalten und eine Untergewichtung zu vermeiden. Die Gleichung (6) stellt das Ergebnis der Regressionsanalyse mit einem Bestimmtheitsmaß von 0,98 nach Gleichung (5) dar.

$$R_{ax,\alpha} = \frac{3,06 \cdot 10^{-3} \cdot l_{ef}^{0,93} \cdot \rho^{1,6} \cdot d^{0,7}}{\sin^2(\alpha) + 1,13 \cdot \cos^2(\alpha)} \quad (6)$$

$$R_{ax,\alpha,k} = \frac{2,1 \cdot 10^{-3} \cdot l_{ef}^{0,93} \cdot \rho_k^{1,6} \cdot d^{0,7}}{\sin^2(\alpha) + 1,13 \cdot \cos^2(\alpha)} \quad \text{für } 30^\circ \leq \alpha \quad (7)$$

$$R_{ax,\alpha,k} = \frac{2,5 \cdot 10^{-3} \cdot l_{ef}^{0,93} \cdot \rho_k^{1,6} \cdot d^{0,7}}{\sin^2(\alpha) + 1,13 \cdot \cos^2(\alpha)} \quad \text{für } \alpha > 30^\circ \quad (8)$$

Um eine charakteristische Ausziehkraft zu erhalten, wurde die charakteristische Rohdichte mit  $\rho_k = 680 \text{ kg/m}^3$  eingesetzt und der Vorfaktor in Gleichung (6) soweit abgesenkt, dass bei Serien mit einem Einschraubwinkel größer gleich  $30^\circ$  mindestens 95 % der Prüfwerte je Serie größer als die charakteristische Ausziehkraft waren. Der Vorfaktor sank auf 82 % (Gleichung (8)). Um die erhöhten Streuungen bei den Serien mit einem Einschraubwinkel kleiner gleich  $15^\circ$  zu berücksichtigen, wurde der Vorfaktor auf 85 %, also 2,1 wie in Gleichung (6) gesenkt. Somit wurde sichergestellt, dass auch bei diesen Serien die charakteristische Ausziehkraft zu etwa 95 % über den gemessenen Werten liegt.

Um die Sensibilität der Variablen  $A$  bis  $D$  nach Gleichung (4) zu überprüfen wurden sie in Regeressionsanalysen einzeln festgesetzt und variiert. Dabei zeigte sich, dass sich bei der Änderung von  $B$  im Bereich von 0,9 bis 1,0  $D$  von 0,74 auf 0,6 absenkte. Durch die erheblichen Auswirkungen einer Rundung des Exponenten der effektiven Einschraublänge auf den Exponenten des Durchmessers, wurde der ursprüngliche Exponent mit 0,93 beibehalten.

## 6. Vergleich

Um das Leistungspotential von Holzschrauben in Eschenholz zu verdeutlichen und die Ergebnisse der Regressionsanalyse zu bewerten, sollen im Folgenden anhand von zwei Beispielen verschiedene Berechnungsmodelle verglichen werden.

Da dem Berechnungsmodell nach DIN 1052:2008 für den axialen Auszieh Widerstand nur Prüfungen an Nadelholz zugrunde liegen, darf für die Berechnung des Ausziehparameters die charakteristische Rohdichte maximal  $\rho_k = 500 \text{ kg/m}^3$  betragen. Für die Abbildung 7 wurden ein Schraubenachsen-Faser-Winkel von  $90^\circ$ , ein Schraubendurchmesser von 8 mm und eine effektive Einschraubtiefe von  $7 d$  angenommen. Man erkennt, dass in diesem Beispiel nur geringe Unterschiede zwischen ÖN EN 1995-1-1:2009 und SIA 265:2003 bestehen. Die linke Kurve nach Schneider (1997) für Buche setzt die der DIN 1052:2008 für die Tragfähigkeitsklasse 2 mit etwas geringerem Anstieg fort, der rechte Teil der Kurve gilt für Azobé. Die nach den Werten von Fairchild ermittelte Kurve umfasst Weich- und Hartlaubhölzer und liegt unter der von Schneider. Dies könnte an der damaligen Schraubengeometrie liegen. Die für Eschen-BSH ermittelte Kurve ähnelt einer vertikal nach oben verschobenen Schneider-Kurve. Der Abstand zu derzeit gültigen Berechnungsmodellen ist beträchtlich. Für die charakteristische Rohdichte von  $\rho_k = 680 \text{ kg/m}^3$  für Esche übertrifft die charakteristische Ausziehtragfähigkeit den Wert nach ÖN EN 1995-1-1:2009 um 59 %.

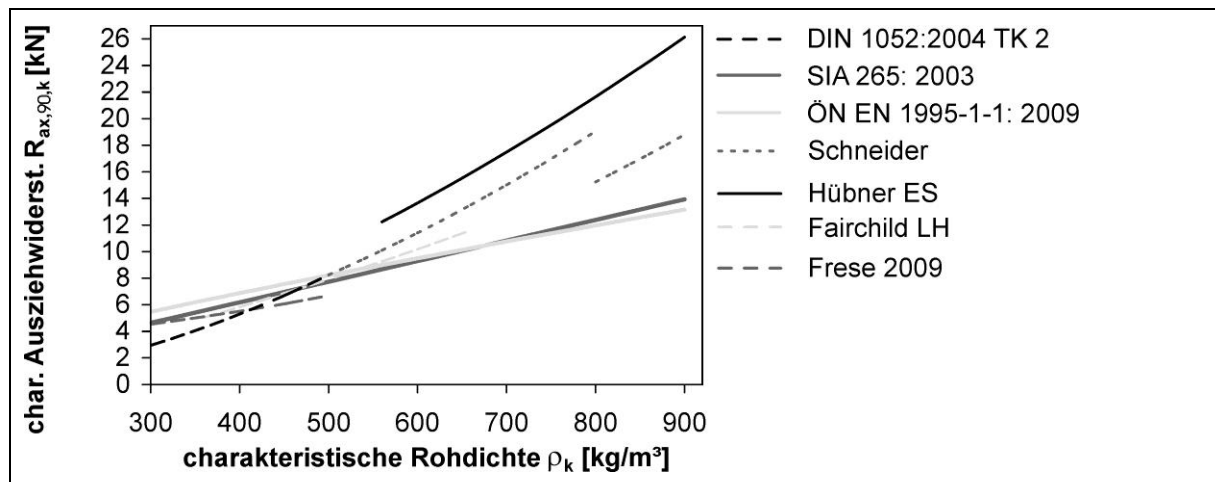


Abbildung 7: charakteristischer Auszieh Widerstand versus char. Rohdichte für  $d = 8 \text{ mm}$ ,  $\alpha = 90^\circ$  und  $l_{eff} = 7 d$

Für Abbildung 8 wurden der Schraubendurchmesser von 8,2 mm, eine charakteristische Rohdichte von  $500 \text{ kg/m}^3$  und eine effektive Einschraublänge von  $7 d$  angenommen. Nach DIN 1052:2008 muss der Schraubenachsen-Faser-Winkel mindestens  $45^\circ$  betragen, nach ÖN EN 1995-1-1:2009 mindestens  $30^\circ$  und die SIA 265:2003 enthält keine diesbezüglichen Beschränkungen. Die Schweizer Norm gibt für das Verhältnis zwischen den Ausziehtragfähigkeiten bei  $90^\circ$  und  $0^\circ$  den Wert 1,5 an. Die Hankinson-Funktion hat einen kräftigeren Schwung wie bei DIN 1052:2008, in der das Verhältnis mit  $4/3$  angegeben ist. Noch flacher verläuft die Kurve nach ÖN EN 1995-1-1:2009 durch den dortigen Verhältniswert von 1,2. Schneider (1997) gibt von  $0^\circ$  bis  $15^\circ$  konstante charakteristische Ausziehtragfähigkeiten an und schlägt für größere Winkel eine gebogene Kurve vor, die bei  $45^\circ$  ihr Maximum erreicht. Die für Eschen-BSH bestimmte Funktion setzt sich ebenso aus zwei Teilen zusammen (Gleichungen (7) und (8)), folgt aber der Hankinson-Funktion. In Zulassung Z-9.1-472 für den SFS-Befestiger WT wird beim Einschrauben in Seitenholz der Einfluss des Winkels zwischen Schraubenachse und Faserrichtung zwischen  $45^\circ$  und  $90^\circ$  als konstant beschrieben (Abbildung 8), wenn die in die Seitenfläche projizierte Schraubenachse parallel zur Faserrichtung verläuft. Bei kleineren Winkeln wird bis auf ein Drittel bei  $0^\circ$  abgemindert.

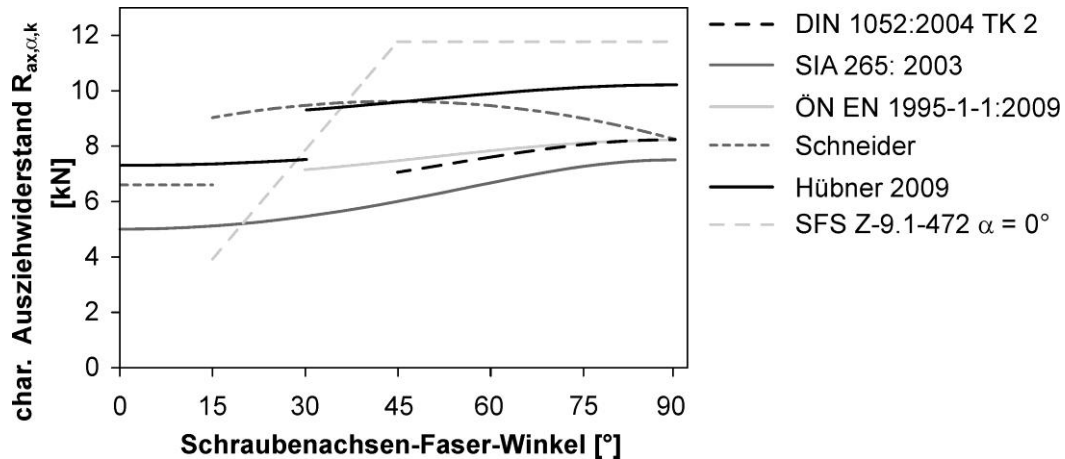


Abbildung 8: charakteristischer Auszieh Widerstand versus Schraubenachsen-Faser-Winkel für  $d = 8,2$  mm,  $\rho_k = 500$  kg/m<sup>3</sup> und  $l_{eff} = 7 d$

Der Sprung des charakteristischen Auszieh Widerstands nach den Gleichungen (7) und (8) bei 30° ist nicht konsistent und auch die Hankinson-Funktion sehr flach ausgebildet. Normiert man die Scherfestigkeit für alle Serien ohne eingebettete Schraubenspitze auf  $d = 10$  mm und  $\rho_{mean} = 752$  kg/m<sup>3</sup> ergibt sich der Boxplot der Abbildung 9. Die Quadrate geben die 5 %-Quantilwerte je Schraubenachsen-Faser-Winkel an und die Rauten den idealen Hankinson-Verlauf. Verbindet man die 5 %-Quantilwerte ist zu erkennen, dass sich beinahe eine horizontale Gerade zwischen 30° und 90° ergibt. Zwischen 0° und 30° steigen die 5 %-Quantilwerte linear an.

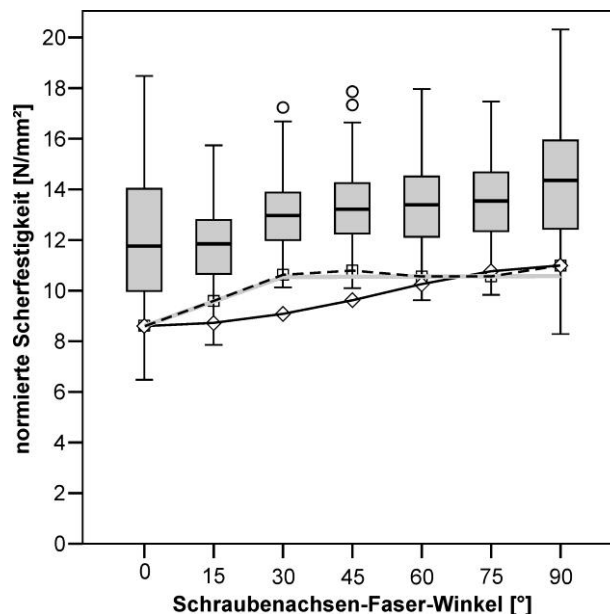


Abbildung 9: Auf  $d = 10$  mm und  $\rho_{mean} = 752$  kg/m<sup>3</sup> normierte Scherfestigkeit für alle Serien ohne eingebettete Schraubenspitze. Die Quadrate geben die 5 %-Quantilwerte an und die Rauten den idealen Hankinson-Verlauf.

Daher wurde in einem vereinfachten Berechnungsmodell die Hankinson-Funktion ersetzt und von 30° und 90° ein konstanter Verlauf angesetzt. Bei 0° ergibt sich ein durch die höhere Streuung um 30 % niedrigerer 5 %-Quantilwert des Auszieh Widerstandes. Die Steigung beträgt also 1 % je Winkelgrad.

Die Einzelwerte nach den Gleichungen (9) und (10) wurden wiederum den gemessenen Werten gegenübergestellt um sicherzustellen, dass 95 % der berechneten Auszieh Widerstände unter den Versuchswerten liegen.

$$R_{ax,\alpha,k} = 2,5 \cdot 10^{-3} \cdot l_{ef}^{0,93} \cdot \rho_k^{1,6} \cdot d^{0,7} \quad \text{für } \alpha \geq 30^\circ \quad (9)$$

$$R_{ax,\alpha,k} = 2,5 \cdot 10^{-3} \cdot l_{ef}^{0,93} \cdot \rho_k^{1,6} \cdot d^{0,7} \cdot (1 - 0,01 \cdot (30^\circ - \alpha)) \quad \text{für } \alpha < 30^\circ \quad (10)$$

Berechnet man die Summe alle Werte für den charakteristischen Auszieh Widerstand von  $0^\circ$ ,  $15^\circ$ , ...,  $90^\circ$  für die Durchmesser 6 mm, 8 mm, 10 mm, 12 mm, 16 mm und 20 mm, die effektiven Einschraub längen von  $4d$ ,  $5d$ ,  $6d$  und  $7d$  und die charakteristische Rohdichte  $680 \text{ kg/m}^3$  erhält man einen Vergleichswert für die Einschätzung der Leistungsfähigkeit der Berechnungsmodelle. Setzt man die Summe der charakteristischen Auszieh Widerstände nach ÖN EN 1995-1-1:2009 gleich eins, ergeben sich für Gleichungen (7) und (8) die 1,78-fache Summe und für Gleichungen (9) und (10) die 1,91-fache Summe. D.h. die charakteristischen Ausziehtragfähigkeiten steigen in Eschen-BSH mit Mittel um 78% bzw. 91% gegenüber dem auf Nadelholz beruhendem Bemessungsmodell der ÖN EN 1995-1-1:2009.

## 7. Zusammenfassung und Ausblick

Anhand der vorliegenden Untersuchung konnte gezeigt werden, dass Holzschrauben und Gewindestangen mit Gewinde nach DIN 7998:1975 in Eschen-BSH hervorragende axiale Auszieh Widerstände erzielen, welche weit über den derzeit nach ÖN EN 1995-1-1:2009, DIN 1052:2008 bzw. SIA 265:2003 berechenbaren liegen. Dies führt zu maximalen effektiven Einschraub längen die etwa dem 6- bis 11-fachen Schraubendurchmesser entsprechen und somit wesentlich unter denen von Nadelholz liegen. Damit bietet es sich an, bei Schraubenverbindungen in Laubholz verstärkt Teilgewindschrauben einzusetzen, deren Schaftdehnung zur Duktilität der Verbindung beiträgt. Die hohe axiale charakteristische Tragfähigkeit kann mit zwei einfach handhabbaren Gleichungen berechnet werden. Die Tragfähigkeit bei Langzeitbeanspruchung und erhöhten Holzfeuchten sollte, insbesondere bei Schraubenachsen-Faser-Winkeln von unter  $30^\circ$ , eingehender untersucht werden um zu prüfen, ob die Abminderungsfaktor  $k_{mod}$  nach ÖN EN 1995-1-1:2009 für Holzschrauben in Laubholz korrekt ist. Nach Pirnbacher (2009) darf der Auszieh Widerstand von Holzschrauben in Nadelholz um 15 % erhöht werden, wenn bei Teilgewindschrauben das Gewinde erst mindestens  $2d$  unter die Holzoberfläche beginnt, sodass sich die „Pfropfenwirkung“ ausbilden kann. Dieser Effekt ist für Esche noch abzuklären. Bei axialer Druckbeanspruchung stellt die seitliche Bettung der Holzschrauben bei der Berechnung der Schraubenknicklasten eine offene Frage dar. Ob die Abstände der Schrauben untereinander und zum Rand die gleichen wie bei Schrauben in Nadelholz sind, ist ebenfalls zu überprüfen.

Bei den Holzschrauben sollte das Verhältnis von Kern- zu Außendurchmesser für den Einsatz in Laubholzarten mit hoher Rohdichte optimiert werden.

## 8. Danksagung

Die Forschungsarbeiten wurden im Rahmen des Projektes 1.2.3\_wood\_connections vom Kompetenzzentrum holz.bau forschung gmbh finanziert und in Kooperation mit dem Institut für Holzbau und Holztechnologie der TU Graz und den Industriepartnern HAAS Fertigungsbau GmbH & Co.KG und SPAX International GmbH & Co. KG bearbeitet. Bei der Durchführung der Prüfungen halfen Bernd Heissenberger, Markus Kummer, Mathias Rasser und Manuel Lögl. Das Projekt wird aus Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Arbeit, des Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie, der Steirischen Wirtschaftsförderungsgesellschaft mbH und des Landes Steiermark gefördert.

## 9. Literatur

- [1] Akamatsu, Akira: *Effects of Withdrawal Resistance, Screw-Shank Diameter, Screw-Length and Specific Gravity on the Lateral Resistance of Screw-Wood Joints with Steel Side-Members*. Mokuzaï Gakkaishi 36(1):15-21 (1990)
- [2] Bejtka, Ireneusz: *Verstärkungen von Bauteilen aus Holz mit Vollgewindeschrauben*. Dissertation, Band 2 der Reihe Karlsruher Berichte zum Ingenieurholzbau, Universität Karlsruhe (TH), Lehrstuhl für Ingenieurholzbau und Baukonstruktion 2005
- [3] Bernasconi, Andrea: *Zum Kapitel 6 10 des Swisscodes: Verbindungen mit eingeleimten profilierten Stäben*. Geesthacht, Deutschland 2000
- [4] Blaß, Hans Joachim; Bejtka, Ireneusz; Uibel, Thomas: *Tragfähigkeit von Verbindungen mit selbstbohrenden Holzschrauben mit Vollgewinde*. Band 4 der Reihe Karlsruher Berichte zum Ingenieurholzbau, Universität Karlsruhe 2006
- [5] Bröker, Friedrich-Wilhelm; Krause, H.A.: *Orientierende Untersuchungen über das Haltevermögen dynamisch beanspruchter Holzschrauben*. Holz als Roh- und Werkstoff 49(10): 381-384 1991
- [6] BWI 2: *Die zweite Bundeswaldinventur*. Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz, Bonn 2002
- [7] Cockrell, Robert A.: *A Study of the Screw-Holding Properties of Wood*. New York State College of Forestry, Technical Publication No. 44, Syracuse, New York, USA 1933
- [8] Eckelman, Carl A.: *Screwholding performance in hardwoods and particleboard*. Forest Products Journal 25(6): 30-35 (1975)
- [9] Fairchild, Iler James: *Holding power of wood screws*. Technologic papers of the Bureau of Standards, No. 319, Vol. 20, Washington: Department of Commerce 1926
- [10] Frese, Matthias and Blaß, Hans Joachim: *Models for the calculation of the withdrawal capacity of self-tapping screws*. Proceedings of CIB-W18, Paper 42-7-3, Dübendorf, Schweiz 2009
- [11] Hankinson, R.L.: *Investigation of Crushing Strength of Spruce at Various Angles to the Grain*. Materials Section Paper No. 130, In: Air Service Information Circular vol. 3 n° 259, Washington, DC.: U.S. Army, Engineering Div. 1921
- [12] Hübner, U.: *Compression and tension perpendicular to the grain of glulam out of ash and beech*. DoktorantInnen-Seminar TU-Graz, 23. Juni 2009
- [13] Hübner, Ulrich; Bogensberger, Thomas; Schickhofer, Gerhard: *Embedding strength of European hardwoods*. Proceedings of CIB-W18, Paper 41-7-6, St. Andrews, Canada August 2008
- [14] Hübner, Ulrich; Leeb, Wolfgang: *Grading Criteria for Beech and Ash used as Building Material*. Proceedings of the 3rd European Hardwood Conference The Beauty of Hardwood, S. 37-43, Sopron/Ungarn, 3.-4. September 2007
- [15] Jablonkay, Peter: *Schrauben unter Ausziehbeanspruchung*. Diplomarbeit an der Professur für Holztechnologie, ETH Zürich 1999

- [16] Kollmann, Franz Friedrich Paul: *Die Esche und ihr Holz*. Schriftenreihe Eigenschaften und Verwertung der deutschen Naturhölzer, Berlin: Julius Springer 1941
- [17] Pirnbacher, Gernot; Schickhofer, Gerhard: *Base parameters of self-tapping screws*. Proceedings of CIB-W18, Paper 42-7-1, Dübendorf, Schweiz 2009
- [18] Pörtner, Carsten and Seim, Werner: *In Holz eingeklebte stiftförmige faserverstärkte Kunststoffe – Experimentelle Untersuchungen und mechanische Modellierung*. In: Bautechnik. 85 (4):219-232, 2008
- [19] Schneider, P.: *Auszugsfestigkeit von EJOT-Rahmenschrauben*. ETH Zürich 1997
- [20] DIN 1052: *Entwurf, Berechnung und Bemessung von Holzbauwerken – Allgemeine Bemessungsregeln und Bemessungsregeln für den Hochbau*. Berlin: Dezember 2008
- [21] DIN 7998: *Gewinde und Schraubenenden für Holzschrauben*. Februar 1975
- [22] ÖNORM EN 13183-1: *Feuchtegehalt eines Stückes Schnittholz – Teil 1: Bestimmung durch Darrverfahren*. Wien: 1. Februar 2004
- [23] ÖNORM EN 1382: *Holzbauwerke – Prüfverfahren – Ausziehtragfähigkeit von Holzverbindungsmitteln*. Wien: 1. November 1999
- [24] ÖNORM EN 1995-1-1: *Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten – Teil 1-1: Allgemeines – Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau*. Wien: 1. Juli 2009
- [25] SIA 265: *Holzbau*. Zürich: 01. März 2003